

MTL 2016 – La Plata, Argentina

UTILIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE HÍBRIDO (GNC+H₂) EN MOTORES DE USO VEHICULAR

Ing. Horacio Trigubó, Ing. Nicolás Galante,
Ing. Roberto Franzi, Ing. Sergio Macchello

Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Buenos Aires – Av. Medrano 951, CABA.
htrigubo@cedi.frba.utn.edu.ar

Palabras clave: combustibles alternativos, combustible híbrido (GNC + H₂), mezcla pobre, emisiones contaminantes, motor original.

Resumen

La creciente motorización global vehicular, la disminución mundial de las reservas de petróleo y la imperiosa necesidad de restringir la emisión de gases contaminantes, han impulsado el desarrollo de combustibles alternativos en reemplazo de los tradicionales.

Por lo mencionado, el grupo de investigación "Combustibles Alternativos" ** del Dpto Ing. Mecánica de la FRBA/UTN y promocionado por CNEA-IEDS*, trabajó en el proyecto de utilizar en motores ciclo OTTO un nuevo combustible gaseoso constituido al mezclar GNC con porcentajes variables de H₂ (5 al 20%) por las siguientes razones:

El Gas Natural está incrementando mundialmente su utilización en reemplazo del combustible nafta por su menor precio de venta, como también los motores OTTO pueden funcionar con modificaciones de bajo costo produciendo menor emisión de HC y CO. Sin embargo, la mayor temperatura de combustión de las mezclas GNC/Aire origina una considerable emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x).

El Hidrógeno es considerado el combustible del futuro por la posibilidad de obtenerlo a partir de recursos renovables (Ej. agua) utilizando métodos no contaminantes (Ej. energía eólica). Además por sus propiedades posibilita que los motores funcionen con mezclas pobres disminuyendo el consumo y las emisiones contaminantes:

- alta velocidad de propagación de la llama
- mínimo valor de energía para su ignición
- amplio rango de inflamación
- su combustión no origina emisiones contaminantes

En consecuencia, se pueden apreciar los argumentos técnicos que impulsan la utilización del nuevo combustible híbrido [GNC +H₂] con la ventaja fundamental de que los motores utilizarán la misma tecnología que para el GNC.

El programa de investigación consistió en el ensayo comparativo en dinamómetro de un motor actual normal de producción al funcionar con combustibles líquido (nafta) y gaseosos [GNC, (GNC+H₂)], verificándose su performance, consumo y emisiones contaminantes, con la condición de que para optimizar los resultados con el híbrido, se modificó: el sistema de alimentación de combustible; el sistema de encendido y la riqueza de mezcla.

La experiencia obtenida se trasladó al funcionamiento de un vehículo Peugeot “408” con el combustible [GNC +H₂ (20%)] con los condicionamientos mencionados. Sus primeros ensayos resultaron totalmente satisfactorios.

Por los resultados positivos logrados en disminuir las emisiones y el consumo de combustible, el proyecto se considera como parte de una transición progresiva hacia el uso del hidrógeno en vehículo, permitiendo a la comunidad su capacitación y adquirir confianza en el nuevo combustible.

* Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, de la Comisión Energía Atómica (CNEA-IEDS).

** Formaron parte de este proyecto los alumnos Ignacio Corro, Javier González, Damián Salinas.

Colaboraron los ingenieros Carlos Baglioni, Francisco Hubana, Martín Rodríguez, Oscar Varela.

1. Introducción

Combustibles alternativos

El panorama mundial de los combustibles tradicionales utilizados en los motores de combustión interna (CI) está en permanente cambio por la disminución de las reservas de yacimientos fósiles, el incremento de su consumo generado principalmente por una mayor utilización de automóviles, y la exigente normativa internacional que, para reducir las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna (CI), ha potenciado la utilización de los denominados “combustibles alternativos”.

Tabla 1. Combustibles alternativos.

MOTORES	COMBUSTIBLES		
	TRADICIONALES	ALTERNATIVOS	
	Líquidos	Líquidos	Gaseosos
OTTO	Nafta	Alcohol *	GNC
			GLP
			H ₂ *
DIESEL	Gasoil	Biodiesel *	-----

* Renovables

GNC: Gas Natural Comprimido /GLP: Gas Licuado de Petróleo

Se considera el H₂ como el combustible del futuro por su posibilidad de obtenerlo de recursos renovables y por sus excelentes propiedades físico-químicas (ver Tabla 2). Sin embargo, para lograr su uso masivo en los motores vehiculares, se deberán superar:

- El mayor costo de producción
- Las dificultades que permitan facilitar su distribución y almacenamiento.

En la actualidad, debido a la magnitud de las reservas de Gas Natural, como también a su menor precio de venta, está en pleno auge la utilización mundial del GNC. En nuestro país, con alrededor de 2 millones de vehículos que lo utilizan, ha generado el desarrollo de una industria de primer nivel en la fabricación de equipos.

Por las posibilidades y ventajas de la mezcla de GNC con H_2 , para constituir el nuevo combustible híbrido (GNC + H_2), describiremos las características fundamentales de ambos:

1.1. Gas Natural

Sus ventajas son:

- Menor precio de venta que los combustibles líquidos.
- El bajo costo de la conversión de los motores ciclo Otto para funcionar con GNC.
- Por su elevado número de octano los motores pueden trabajar con mayor relación de compresión (13:1), que la actual generalmente utilizada (10:1).
- El CH_4 por tener 1C resulta menos contaminante en CO y HC, que el Isooctano de la nafta con 8C.

Sus desventajas son:

- La menor velocidad de propagación de la llama respecto a la nafta, requiere que el encendido de la mezcla se produzca con bastante anticipación del PMS (punto muerto superior).
- Al ser la temperatura de combustión más elevada que al utilizar nafta, se origina mayor emisión de NO_x .
- Por su menor densidad, el gas ocupa más volumen en el cilindro del motor que la nafta, ocasionando por la menor carga de aire una pérdida de potencia de alrededor de un 15%.

1.2. Hidrógeno

- Es considerado como el combustible más promisorio por:
- Su obtención a partir de recursos renovables.
- Elevado poder calorífico (120 MJ/kg).
- Velocidad de llama cinco veces mayor que la nafta; aproxima al proceso teórico de combustión a volumen constante mejorando la eficiencia térmica.
- Mínimo valor de energía para su ignición.
- Amplio rango de inflamación, permite que los motores de CI funcionen con mezcla pobre, disminuyendo el consumo de combustible y las emisiones contaminantes.
- Durante su combustión se genera vapor de agua.
- Debido al menor poder calorífico inferior volumétrico, genera menos potencia que los combustibles nafta y GNC.

La posibilidad de que el H_2 pueda ser utilizado masivamente en los vehículos dependerá que su fabricación, distribución y uso en el vehículo se pueda efectuar con un costo aceptable y en el que habrá que incluir la ponderación económica de la "mejora ambiental".

Tabla 2. Propiedades de Hidrógeno, Metano y Nafta*.

Propiedades	Unidad	Hidrógeno	Metano	Nafta
Densidad (líquido)	kg/dm ³	0,07	0,423	0,73 - 0,74
Densidad (gas 25°C; 1 atm)	kg/ m ³	0,083	0,651	---
Densidad (gas 25°C; 200 bar)	kg/ m ³	15	130	---
Aire/Comb. Estequiométrico (vol.)	v/v	2,37	4,75	49,2
Aire/Comb. Estequiométrico (masa)	m/m	34,3	17,4	14,7
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	120	50	43,5
Límites de inflamabilidad	% vol	4 - 75	5,3 - 15	1 - 7,6
Energía mínima de encendido	mJ	0,02	0,29	0,24
Velocidad de llama laminar (NPT)	cm/seg	170	20	37 - 43
Número Octano Research	RON	60	120	97

* BOSCH, Manual de la Técnica del Automóvil

1.3. Mezclas Gas Natural (Metano) + Hidrógeno

El uso de estas mezclas híbridas gaseosas, comercialmente denominadas “Hythane” (Hydrogen, Me-thane), facilita su utilización en los motores actuales y tiene como objetivo aprovechar las ventajas complementarias de ambos combustibles. Éstas son:

- Se utiliza el mismo equipamiento del GNC instalado en el vehículo.
- Para obtener buenos resultados en cuanto a emisiones y potencia, se agregan cantidades reducidas de hidrógeno (la experiencia internacional indica del 20 al 30%).
- Como consecuencia, no incrementa el costo del combustible en forma apreciable.
- Al aumentar el H₂, la velocidad de llama del combustible híbrido reduce las emisiones de HC, de CO y CO₂.
- Por el gran rango de inflamabilidad del H₂, el motor puede funcionar con mezclas pobres, emitiendo menor NO_x y disminuyendo el consumo de combustible (Ver “2. Emisiones contaminantes”).
- De la Tabla 2, se observa que, por el menor PCI volumétrico del H₂ respecto del Metano, al incrementar el porcentaje de H₂, reduce la potencia del motor. Por lo tanto, el contenido de H₂ deberá adecuarse al uso del motor.
- Puede considerarse como una transición hacia el uso masivo del hidrógeno en vehículos de transporte.

2. Emisiones contaminantes

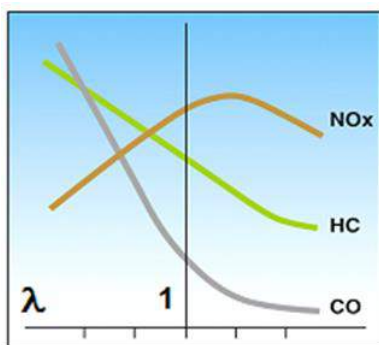
Por ser los motores de CI una de las causas fundamentales de contaminación ambiental (CO , HC , NO_x , CO_2), se ha generado una normativa cada vez más restrictiva sobre las emisiones (ej.: Euro 2, 3, 4, 5, 6).

Una variable muy importante para determinar la emisión en los motores Otto es el valor denominado "Lambda", que es la relación entre la cantidad real instantánea de aire-combustible y la cantidad estequiométrica.

Tabla 3. Relación Lambda.

Lambda	= 1	> 1	< 1
Mezcla	Estequiométrica	Pobre (exceso de aire)	Rica (exceso de combustible)

En la práctica, por variación de la cantidad de combustible, los motores Otto trabajan entre Lambda 0,9 y 1,10, pudiendo alcanzar otros valores según la exigencia del funcionamiento, lo que produce diversas emisiones contaminantes (HC , CO , NO_x) (ver Figura 1).



HC	Hidrocarburos de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
<u>NO_x</u>	Óxidos de Nitrógeno

Figura 1. Variación del CO , HC y NO_x en función de Lambda.

En la figura 1, se observa la importancia que tiene lograr que el motor trabaje con mezclas pobres para disminuir las emisiones.

3. Programa de investigación

El Grupo de Investigación de la FRBA planificó el ensayo en dinamómetro de un motor actual de producción, Volkswagen modelo Gol, con todos los combustibles existentes en nuestro ámbito, con el que se efectuaron pruebas comparativas para obtener potencia, par motor, consumo específico y emisiones contaminantes.

Tabla 4. Especificaciones del motor ensayado.

Datos Generales	MOTOR
Marca / Modelo	Volkswagen / Audi-Gol
Tiempos / Cant. cilindros	4 / 4
Cilindrada total (cm ³)	1600
Relación Compresión	10:01
Sistema de refrigeración	agua
Sistema de combustible	Nafta => Inyección "Marelli"
	GNC-GLP => Aspiración
	GNC-GLP – GNC + H ₂ => Inyección "PVR" (5ª generación)
Sistema de encendido / APMS	"Bosch" / 9°
Sistema de escape	Silenciador y catalizador original
Sistema de gestión optimizado	GNC + H ₂ => "PVR" + "MoteC"

3.1. Consideraciones y programas de ensayo

- Los ensayos en dinamómetro (plena carga) se efectuaron según la Norma CETIA 3-1 (Comisión Estudios Técnicos Industria Automotriz Argentina).
- Las mediciones de las emisiones contaminantes y temperatura de los gases de escape se realizó antes del catalizador para obtener una lectura real.
- Los ensayos del combustible nafta fueron efectuados con la calibración de fábrica original del motor.
- Para los combustibles gaseosos, se utilizaron los sistemas por aspiración e inyección.
- En las mezclas gaseosas con hidrógeno, el proveedor "Air Liquide" utilizó metano (CH₄). Las mezclas ensayadas:



En el GNC varían según el yacimiento del que proviene, los porcentajes de sus componentes (mezclas de Metano ~90%, Etano, Propano, Butano). Por ello y dado que en la mezcla del combustible híbrido se utilizaba CH₄, se ensayó el motor con este combustible, para utilizarlo como referencia respecto a las determinaciones con GNC y [CH₄ + H₂].

4. Ensayos en dinamómetro

A continuación, se presentan los resultados energéticos de algunos de los combustibles ensayados:

4.1. Comparación Curvas de Potencia de Nafta, GLP y GNC (Sistema por Depresión $\lambda = 1$)

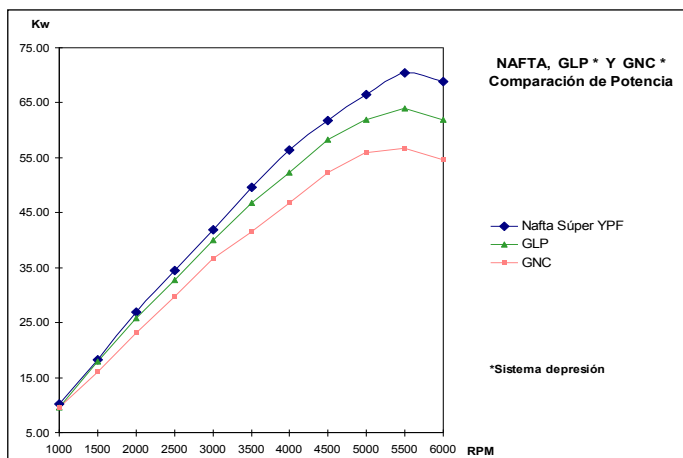


Figura 2. Comparación curvas de potencia - Nafta "Súper", GLP y GNC.

Los combustibles gaseosos GNC y GLP fueron ensayados con el sistema por depresión (o aspiración) por lazo cerrado, para el cual se mantiene (λ) = 1, y con su APMS optimizado.

4.2. Sistema de inyección de combustibles gaseosos

Es el sistema más moderno utilizado en la actualidad, por el cual la cantidad de combustible está determinada por una central electrónica, independiente de la ECU original del motor. Así, y mediante un inyector de combustible gaseoso por cilindro, se logra un mejor llenado de los mismos y un control continuo de la mezcla aire-gas para disminuir las emisiones.

Con este sistema de inyección, se ensayaron los combustibles:

Gas Natural Comprimido (GNC) - Metano (CH_4) - [Metano + Hidrógeno (5%) (V/v)];
[Metano + Hidrógeno (20%) (V/v)].

Para cada uno de estos combustibles, se determinó la mejor curva de potencia a través de la modificación del APMS, de las curvas de avance del encendido y los tiempos de inyección.

4.2.1. Curvas características GNC – CH₄ - [CH₄ + H₂ (5%)]

Calibración original del motor: Inyección y Encendido ($\lambda = 0,85$)

- En el GNC varían los porcentajes de sus componentes según el yacimiento del que proviene (mezclas de Metano ~90%, Etano, Propano, Butano). Por ello, y dado que en la mezcla del combustible híbrido se utilizaba Gas Metano, se ensayó el motor con este combustible, para utilizarlo como referencia respecto de los ensayos con mezclas [CH₄ + H₂], y el GNC.
- Con el fin de adquirir confianza en el manejo de un gas de alta reactividad, como el H₂, se ensayaron mezclas al 5% en volumen, por lo cual las propiedades de la mezcla son, principalmente, las del CH₄.

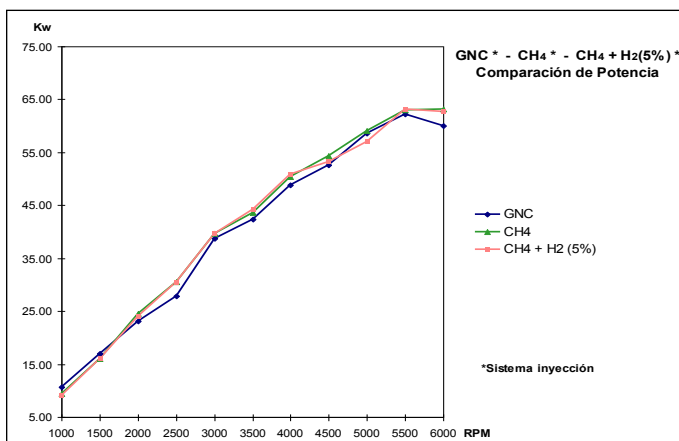


Figura 3. Comparación potencias GNC – CH₄ – [CH₄ + H₂ (5%)].

Se observa que no existen diferencias apreciables entre el CH₄ y el combustible híbrido, ya que el 5% de H₂ no influye. Con el GNC, se verifica menor valor en la potencia y en el Ce.

5. Investigación para utilizar el combustible híbrido GNC + H₂ (20%) optimizando el funcionamiento del motor

La información internacional indica que las mezclas de GNC con H₂ entre 20 al 30% v/v permiten lograr resultados convenientes en cuanto a emisiones y consumo.

Para poder verificarlo en nuestro motor VW y a efectos de aprovechar las propiedades del H₂, se le instaló el siguiente equipamiento:

- Sistema para control del motor "MOTEC", que permite programar las variables encendido y alimentación de combustible mediante una ECU (Engine Control Unit), independiente de la original del motor.
- Sistema de control electrónico de inyección de combustibles gaseosos "PVR", (de 5^o generación) que posibilita dosificar la cantidad en función del estado de carga del motor.

- Medidor de riqueza de mezcla (señal Lambda), constituido por un instrumento y una sonda Lambda lineal "BERTA INNOVATE".

Para lograr que este instrumental pudiera ser utilizado en los trabajos de investigación, fue necesario obtener los programas de calibración (originales para Nafta) de encendido y alimentación de combustible incorporados en la ECU "Marelli" standard del motor. Al ser un "sistema cerrado", no permite acceder a la información de la fábrica (VW). Por ello, debimos efectuar numerosas pruebas de funcionamiento con el motor para determinar los parámetros originales e incorporarlas al equipo MOTEC. Esto permitió investigar los nuevos parámetros de avance al encendido y tiempos de inyección para diferentes Lambda con que se ensayó el combustible híbrido.

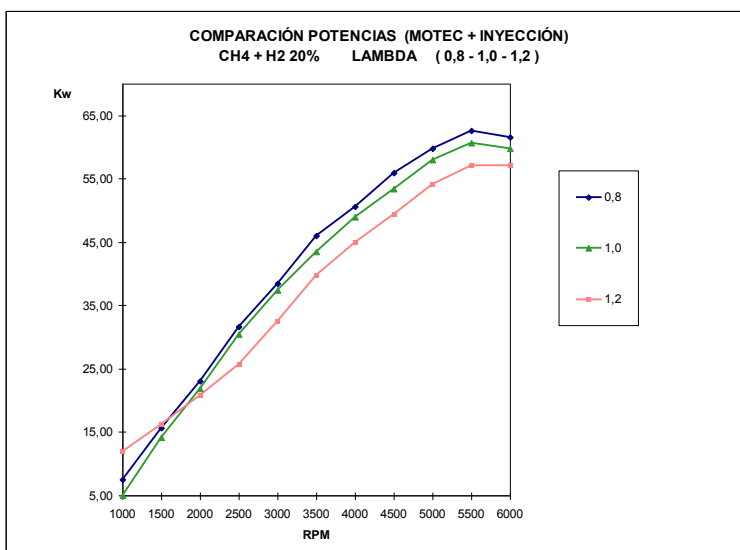


Figura 4. Comparación potencias MOTEC y [CH₄ + H₂ (20%)] para λ = 0,8 – 1 – 1,2.

Tabla 5. NAFTA y [CH₄ + H₂ (20%)] Valores comparativos para diferentes Lambda.

Combustible	λ	RPM	Potencia (kw)	Temp. Escape (°C)	Ce (gr/kwh)	CO (%vol)	HC (ppm)	NOx (%vol)	CO ₂ (%vol)
Nafta super	0,8	3000	45,5	662	258,5	2,32	104	1580	13,6
CH ₄ +H ₂ (20%)	1,2	3000	34,1	536	168,1	0,17	50	1517	8,6

En la tabla 5 se observa:

- Al aumentar Lambda (mezcla pobre), disminuye la temperatura de escape, con la consecuente disminución de NOx.
- Se observa para $\lambda = 1,2$ y encendido optimizado, disminución de potencia, mejora del Ce y se reducen las emisiones.

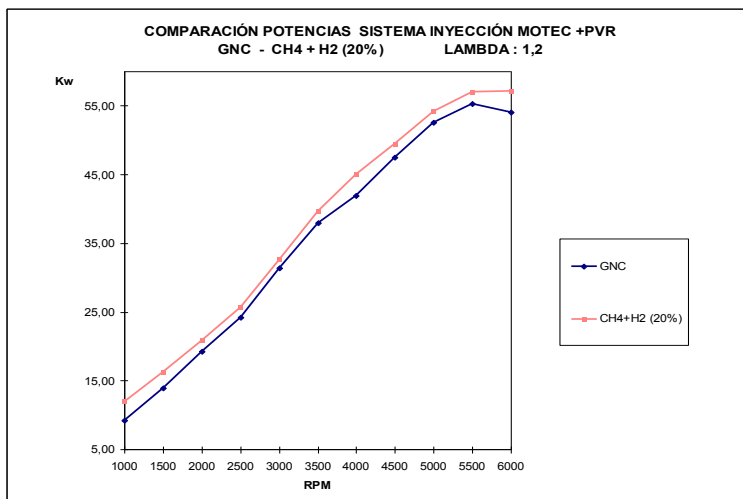


Figura 5. Comparación potencias MOTEC con GNC y [CH₄ + H₂ (20%)] para $\lambda = 1,2$.

En la figura se observa como resultado de una mejor combustión, con el combustible híbrido se logra mayor potencia que con el GNC para igual Lambda.

6. Utilización del combustible híbrido [CH₄ + H₂ (20%)] en vehículos actuales equipados con sistemas de inyección de 5ª generación

Dada la perspectiva de que este combustible híbrido se utilice en estos vehículos, el Grupo de Investigación efectuó ensayos de acuerdo a las siguientes condiciones:

6.1. En Dinamómetro

- Motor VW con su ECU original ("Marelli")
- Sistema de inyección de combustibles gaseosos ("PVR" – 5ª generación)
- Curva de avance de encendido a determinar (MoteC)
- Lambda pobre (objetivo: 1,2)

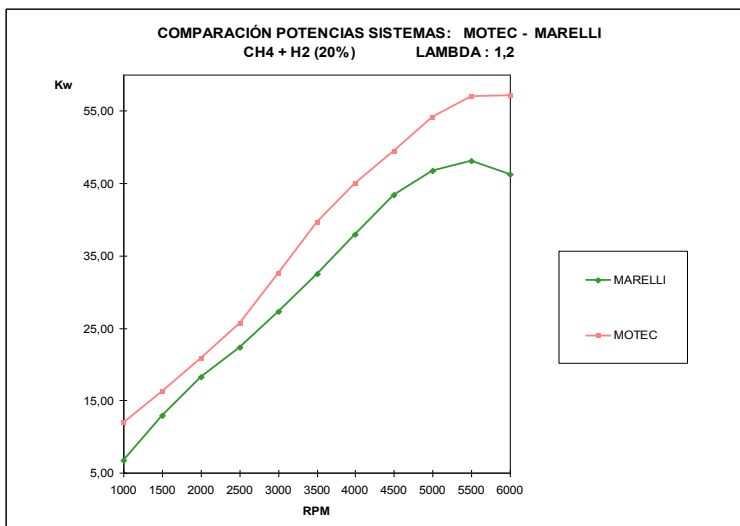


Figura 6. Comparación potencias sistemas MOTEC y MARELLI con $[CH_4 + H_2 (20\%)]$ para $\lambda = 1,2$.

Al comparar las curvas de potencia del mismo combustible híbrido, trabajando con $\lambda = 1,2$ para los sistemas optimizado (MOTEC) y standard (MARELLI), se aprecia la magnitud del trabajo a efectuar para lograr un mejor rendimiento del combustible con el equipamiento standard del motor y el sistema de inyección de gases de 5ª generación.

Por los mejores resultados obtenidos en las curvas de performance con el combustible híbrido (alternativas 5% y 20%) respecto al GNC, se comprueba la importancia que presenta, para nuestro país, lograr su correcta implementación. También habrá que investigar cuál es el Lambda más conveniente de acuerdo con el porcentaje de hidrógeno a utilizar en su mezcla con GNC y su adecuación a los diferentes motores.

6.2. Ensayos en vehículo

El grupo de investigación adaptó el motor de un vehículo Peugeot "408" para que funcione con los combustibles: líquido, nafta (original) y gaseosos, GNC y $[GNC + H_2 (20\% v/v)]$.

Para ello (ver fotos adjuntas) se equipó e instrumentó de manera similar a lo efectuado con el motor en dinamómetro.

Se comprobó al ensayarlo en la pista de pruebas de la empresa Peugeot que el vehículo funciona correctamente sin presentar anomalías durante las pruebas de manejo y aceleración.

7. Conclusiones

Por los mejores resultados obtenidos en las curvas de performance con el combustible híbrido (alternativas 5% y 20%) respecto al GNC, se comprueba la importancia que presenta, para nuestro país, lograr su correcta implementación. También habrá que

investigar cuál es el Lambda más conveniente de acuerdo con el porcentaje de hidrógeno a utilizar en su mezcla con GNC y su adecuación a los diferentes motores.



Figura 7. Vista del motor con el equipamiento de inyección de gas.



Figura 8. Vista de la instalación de los tubos con mezcla $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ (20%).



Figura 9. Ensayo del vehículo "Peugeot 408" en pista.

8. Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Dr. Daniel Pasquevich y a la Dra. Cristina Fernández de Giorgi, de la CNEA, a los docentes del Laboratorio de Máquinas Térmicas (Ing. Carlos Baglioni, Ing. Francisco Hubana, Ing. Martín Rodríguez, Ing. Oscar Varela, Sr. Néstor Frangi. Alumnos: Ignacio Corro, Javier González, Damián Salinas), a los integrantes de los departamentos de Mecánica y Ciencia y Técnica de la FRBA/UTN, a las empresas Air Liquide, PSA Peugeot-Citroën que han participado con nosotros en la realización del trabajo de investigación.

9. Referencias

- [1] Estévez, Esteban, y Otros. *Effects of hydrogen supplementation in the combustion of natural gas fuelled engines*. Hydrogen Research Institute, Université du Québec, Canadá. 2003.
- [2] Kindelan, Jesús. *El hidrógeno, combustible en motores*. Politécnica de Valencia, España. 2009.
- [3] Sierens, Roger. *Hydrogen fuelled internal combustion engines*. Universiteit Gent, Holanda. 2007.
- [4] Manivannan, A.; Porai, P.; Chandrasekaran, S.; Ramprabhu, R. *Lean Burn Natural Gas Spark Ignition Engines*, SAE, EE.UU, 2003.
- [5] Karim, G. *Hydrogen an additive to methane for spark ignition engine applications*. Pergamon, EE.UU, 1999.